

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

## DETEKCE PATOLOGIÍ V EKG ZÁZNAMECH

DETECTION OF PATHOLOGIES IN ECG SIGNALS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radek Němec

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub Kašpar

BRNO 2019

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Biomedicínská technika a bioinformatika**

Ústav biomedicínského inženýrství

**Student:** Radek Němec

**ID:** 194854

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2018/19

**NÁZEV TÉMATU:**

## Detekce patologií v EKG záznamech

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Nastudujte a popište základní principy a metody detekce patologií v EKG záznamech a vypracujte literární rešerši v této oblasti. 2) Vytvořte detektor příznaků, vhodných pro detekci patologií a otestujte ho na CSE databázi. Dosažené výsledky diskutujte. 3) Vytvořte program vhodný pro vyhodnocení nadetekovaných příznaků. 4) Pomocí Holteru vytvořte vlastní databázi EKG záznamů. 5) Otestujte vytvořený detektor a program pro vyhodnocení na této databázi. Dosažené výsledky diskutujte a porovnejte s jinými autory.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] LAGUNA, P., JANÉ, R., CAMINAL, P. Automatic detection of wave boundaries in multilead ECG signals: Validation with the CSE database. Computers and biomedical research. 1994, vol. 27, no. 1, pp. 45–60.

[2] CHOUHAN, V., MEHTA, S.S., LINGAYAT, N.S. Delineation of QRS-complex, P and T-wave in 12-lead ECG. Journal of Computer Science and Network Security. 2008, vol. 8, no. 4, pp. 185-190.

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 24.5.2019

**Vedoucí práce:** Ing. Jakub Kašpar

**Konzultant:**

**prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá metodami pro detekci patologií v EKG záznamech. V první části je probrána základní teorie anatomie srdce, elektrokardiografie a jednotlivých srdečních patologií. Druhá část je soustředěna na předzpracování EKG záznamu, detekci QRS komplexů a následně detekci jednotlivých patologií. Ve třetí části je detektor testován na CSE databázi a poté i na vlastních naměřených datech.

## **Klíčová slova**

EKG záznam, Srdce, Patologie, Filtrace signálu, QRS detekce, CSE databáze, Komorové extrasystoly, Blokáda levého Tawarova raménka, Blokáda pravého Tawarova raménka

## **Abstract**

This thesis attempts with methods for detection of pathologies in ECG signals. The first part is focused on the basic theory of heart anatomy, electrocardiography and individual heart pathologies. The second part describes the preprocessing of ECG signals, detection of QRS complexes and detection of individual pathologies. In the third part the detector is being tested on CSE database and my own measured data.

## **Keywords**

ECG signal, Heart, Pathologies, Signal filtration, QRS detection, CSE database, Ventricular extrasystoles, Left bundle branch block, Right bundle branch block

## **Bibliografická citace:**

NĚMEC, Radek. *Detekce patologií v EKG záznamech*. Brno, 2019, 46 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav biomedicínského inženýrství. Vedoucí práce: Ing. Jakub Kašpar.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Detekce patologií v EKG záznamech jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 20. května 2019

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jakubovi Kašparovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval svým rodičům a prarodičům za veškerou podporu v průběhu dosavadního studia.

V Brně dne 20. května 2019

.....  
podpis autora

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>SRDCE.....</b>	<b>9</b>
2.1	Anatomie srdce .....	9
2.2	Převodní systém srdeční .....	10
<b>3</b>	<b>ELEKTROKARDIOGRAFIE .....</b>	<b>13</b>
3.1	Záznam EKG.....	14
3.2	EKG křivka.....	15
3.3	Typy rušení a filtrace.....	18
3.4	Spektrální vlastnosti EKG.....	20
3.5	Vyhodnocení záznamu.....	21
<b>4</b>	<b>PATOLOGIE SRDCE .....</b>	<b>22</b>
<b>5</b>	<b>REALIZACE FILTRACE A QRS DETEKTORU .....</b>	<b>24</b>
5.1	Filtrace driftu .....	24
5.2	Filtrace myopotenciálů.....	25
5.3	Filtrace brumu .....	26
5.4	Detekce QRS komplexů .....	27
<b>6</b>	<b>DETEKTOR PATOLOGÍ .....</b>	<b>30</b>
6.1	Detekce bradykardie a tachykardie .....	30
6.2	Detekce komorových extrasystol .....	31
6.3	Detekce blokády levého Tawarova raménka.....	33
6.4	Detekce blokády pravého Tawarova raménka .....	34
<b>7</b>	<b>VYHODNOCENÍ A GUI .....</b>	<b>36</b>
7.1	CSE databáze .....	36
7.2	Vlastní databáze (holter).....	36
7.3	Vyhodnocení dat.....	36
7.4	GUI.....	39
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>41</b>

<b>LITERATURA.....</b>	<b>42</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>45</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>46</b>



# 1 ÚVOD

V dnešní době se u spousty pacientů potýkáme s nejrůznějšími druhy srdečních patologií, které mohou být později příčinou jejich smrti. Na EKG křivce nemocných pacientů můžeme nalézt lehce detekovatelné patologie typu tachykardie nebo bradykardie, ale také komplikované útvary v podobě mírných až rozsáhlých elevací nebo depresí dílčích segmentů záznamu. Tato práce se mimo základní znalosti z oblasti elektrokardiografie a anatomie srdce zabývá filtrací EKG signálu, detekcí QRS komplexů a vytvořením programu pro detekci srdečních patologií s co největším důrazem na spolehlivost detekce, která je v této oblasti klíčová.

Nejprve jsou v práci probrány základní anatomické poznatky srdečního svalu a fyziologické děje v něm probíhající, což vede k pochopení vzniku EKG signálu. Dále je detailně rozebrána EKG křivka. Z medicínského hlediska jsou popsány její významné body a segmenty, z hlediska technického pak její spektrální vlastnosti, typy rušení a filtrace.

Druhá polovina práce se věnuje návrhu filtrů uzpůsobených k filtraci nežádoucích jevů v signálu, návrhu detektoru QRS komplexů a poté samotných algoritmů pro detekci patologií. Program je uzpůsoben na rozměření signálu, detekci základních arytmií v podobě bradykardie a tachykardie, komorových extrasystol a blokády pravého a levého Tawarova raménka. Pro jednodušší ovládání a přehlednost bylo k programu vytvořeno grafické uživatelské rozhraní.

Jednou z částí této bakalářské práce bylo také naměření vlastní databáze klidových a zátěžových EKG signálů na skupině pacientů pomocí holteru. V závěru práce jsou naprogramované algoritmy testovány a vyhodnoceny jak na kompletní CSE databázi obsahující 125 signálů, tak právě na databázi vlastní.

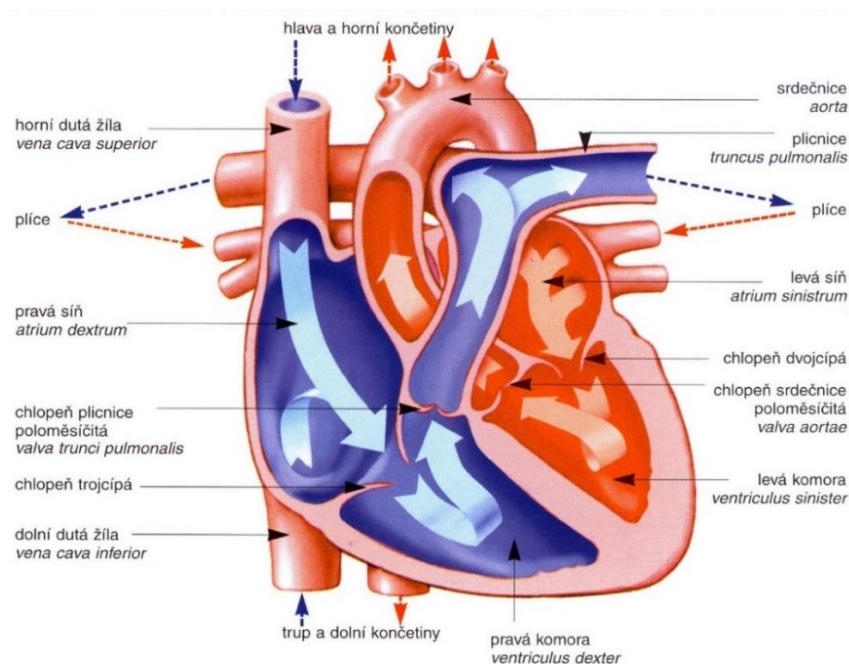
## **2 SRDCE**

K pochopení vzniku EKG signálu a jeho jednotlivých segmentů je nutností znát základní anatomii srdce, fyziologickou činnost a elektrické jevy v němž probíhají. V této kapitole budou probrány veškeré informace, na jejichž základě bude vysvětlen princip vzniku EKG signálu.

### **2.1 Anatomie srdce**

Srdce je dutý orgán kuželovitého tvaru, který má vazivově svalový charakter. Je uloženo mezi plícemi, hrudní kostí a bránicí. U dospělého člověka váží 300 g a dělíme ho na čtyři dutiny: pravou a levou síň, ve kterých se hromadí krev přitékající do srdce a pravou a levou komoru, sloužící k vypuzení krve ze srdce. Komory a síně jsou od sebe odděleny čtyřmi chlopněmi (přepážkami), které povolují tok krve pouze jedním směrem.

Srdce je uloženo v perikardu (osrdečníku) a jeho stěnu tvoří tři vrstvy – endokard, myokard a epikard. Na srdce jsou napojeny cévy – žíly, kterými krev vstupuje do srdce, a tepny, kterými je krev ze srdce vypuzována. Mezi nejdůležitější patří plicní tepna, která odvádí odkysličenou krev z pravé komory do plic a aorta – největší tepna v těle odvádějící krev z levé komory do tělního oběhu. Dále se zde nachází věnčité tepny a plicní a duté žíly. Základními srdečními buňkami jsou myocyty, které tvoří většinu srdeční hmoty [1].

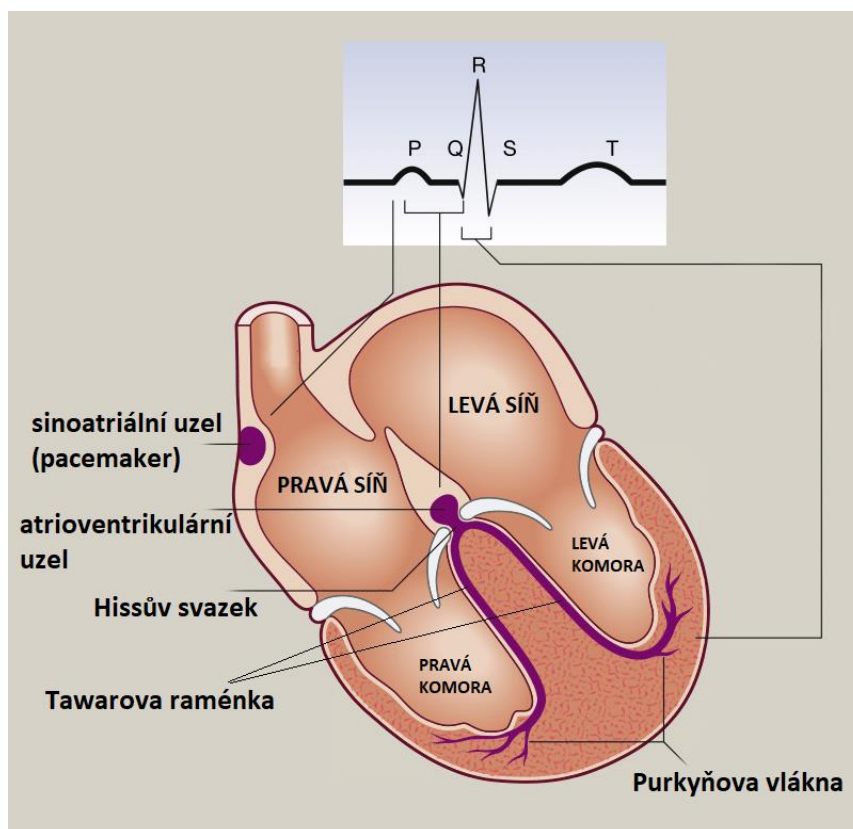


Obr. 1: Stavba srdce [2]

## 2.2 Převodní systém srdeční

Kardiovaskulární systém byl vyvinut tak, aby zajistil dostatečnou perfuzi krve tkáním a orgánům v celém lidském těle, díky čemuž jsou všechny tkáně zásobovány živinami a kyslíkem.

Jeden srdeční cyklus dělíme obecně na 2 fáze – systolu a diastolu. V průběhu systoly, neboli kontrakce komor, je krev čerpána do oběhu. V průběhu diastoly, neboli fáze relaxace (ochabování), je srdce plněno krví. Střídání systoly a diastoly nazýváme obecně vzruchovou aktivitou, kterou si srdce samo vytváří v převodním systému srdečním (Obr. 2). Jedná se o svalovou tkáň umožňující vytvářet a vést vzruchy. Pacemakerem, neboli udavatelem rytmu zde rozumíme sinoatriální (SA) uzel, který je umístěn v horní části stěny pravé síně. Za fyziologických podmínek zde vzniká vzruch a je přísně regulován autonomním nervovým systémem. Dochází tak ke zvyšování a snižování aktivačního potenciálu a srdeční frekvence. Elektrické impulzy ze sinoatriálního uzlu putují Bachmannovou dráhou do levé síně, odkud se přenáší přes pravou síň do atrioventrikulárního (AV) uzlu. Při jakémkoliv poškození SA uzlu přebírá roli pacemakeru AV uzel. Skrze Hissův svazek, levé a pravé Tawarovo raménko, větvící se v Purkyňova vlákna, je elektrický vzruch rozveden na pracovní myokard komor [3].



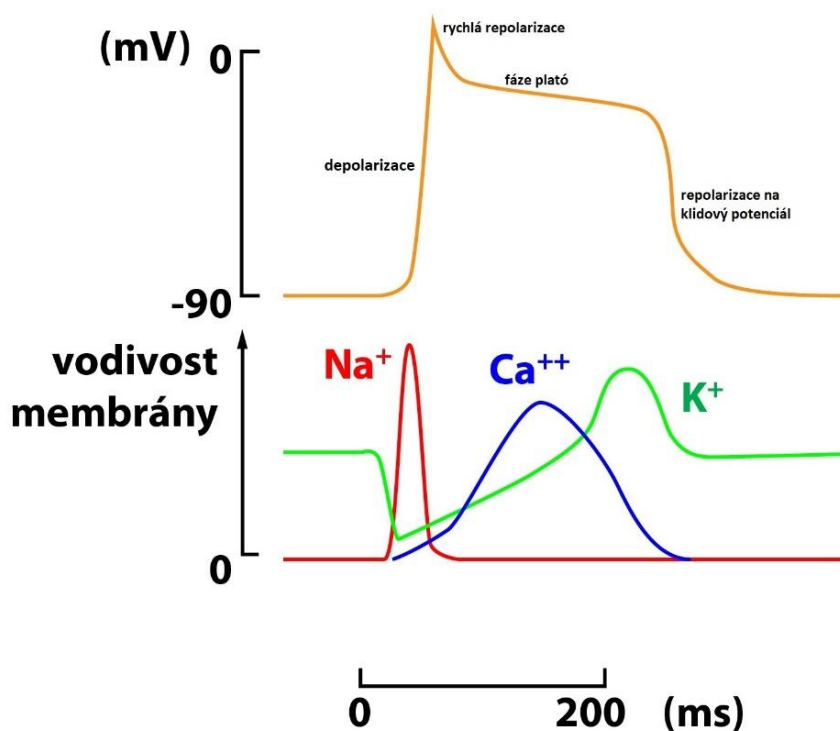
Obr. 2: Převodní systém srdeční [1]

### Klidový a akční membránový potenciál

Předpokladem jakékoliv srdeční aktivity je klidový membránový potenciál. Hodnota tohoto potenciálu je přibližně -70 až -90 mV. Záporné znaménko se zde dle zavedené konvence nachází z důvodu záporného potenciálu vnitřního prostředí vzhledem k vnějšku buňky. Hlavním intracelulárním iontem vně buňky je draslík ( $K^+$ ), v extracelulárním prostředí pak převažuje sodík ( $Na^+$ ). Propustnost membrány buňky srdečního svalu je pro draslík znatelně větší než pro sodík. Rozpoložení iontů v obou prostředích tak musí být korigováno sodno-draselnou pumpou (enzym  $Na^+-K^+$  ATPáza nacházející se v membráně buněk) [4].

Elektrická stimulace je vytvořena sekvencí iontových proudů kanály v membráně srdečních myocytů, což vede k srdeční kontrakci sestávající se z 5 fází. První fází je depolarizace, způsobená otevřením  $Na^+$  kanálů. Napětí z -70 až -90 mV prudce stoupá na 0 až 20 mV. Následuje rychlá repolarizace, při které se tyto kanály zavřou. Třetí fází je fáze plató, při které se pomalu otevírají  $Ca^{2+}$  kanály udržující

kladný náboj uvnitř buňky a následuje konečná repolarizace, tj. návrat do původního stavu. Průběh akčního potenciálu a jednotlivých iontových kanálů je zobrazen na Obr. 3.

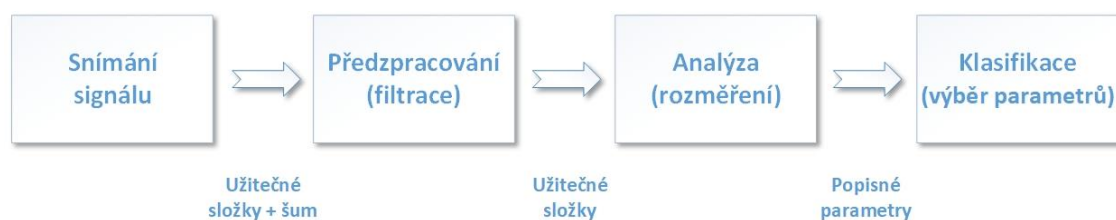


*Obr. 3: Akční potenciál buňky pracovního myokardu [5]*

Nutno zmínit dvě fáze, ve kterých se mění odolnost srdečních buněk vůči podráždění. První z nich se nazývá absolutní refrakterní fáze, probíhající prvních 300 ms od počátku depolarizace. Během této fáze je srdeční svalová buňka odolná vůči dalšímu podráždění. Dalších 100 ms v průběhu repolarizace mluvíme o relativní refrakterní fázi. V této fázi by již impuls přivedený na buňku srdečního svalu vyvolal další kontrakci (depolarizace – plató – repolarizace). Tyto rytmicky se opakující kontrakce jsou utvářeny srdcem samotným ve výše zmíněném převodním systému [4].

### 3 ELEKTROKARDIOGRAFIE

Elektrokardiogram (EKG) je v podstatě snímání elektrické aktivity generované srdcem. Jedná se o efektivní neinvazivní nástroj pro hojnou řadu medicínských aplikací jako jsou měření tepové frekvence, hodnocení srdečního rytmu, diagnostika srdečních arytmí a abnormalit nebo biometrické identifikace. Využívá silného napětí, které tvoří elektrické srdeční pole, díky němuž lze EKG signál snímat z povrchu těla, popř. přímo ze srdce. Jedna z hlavních oblastí, ve které je EKG vyšetření vyžadováno, je diagnóza kardiovaskulárních onemocnění, na které v dnešní době umírá největší procento pacientů. Mezi kardiovaskulárními chorobami se pak nejčastěji vyskytují srdeční arytmie. Jedním z nejefektivnějších nástrojů pro identifikaci arytmí je detekce vlastním okem. Každý EKG signál má charakteristický tvar a morfologické rysy, poskytující klinickou informaci pro automatickou detekci a klasifikaci EKG vzoru. Tato detekce však není vždy úplně přesná kvůli rozdílům v EKG signálech u pacientů s lišícími se vrozenými predispozicemi. V praxi to pak znamená, že jedna arytmie představuje u dvou pacientů rozdílný tvar EKG křivky a taktéž, dvě různé arytmie mohou mít u dvou pacientů tvar podobný. Než se však u automatické detekce srdečních patologií dostaneme k samotné analýze, musí být signál filtrován. Každý biosignál totiž kromě užitečné složky obsahuje také šum, kterého je nutné se zbavit. Detailnější informace o typech šumu a jejich filtraci budou probrány v kapitole 3.3. Poté můžeme přistoupit k samotné analýze signálu a v poslední řadě ke klasifikaci patologií. Obecné schéma zpracování EKG signálu je možné vidět na Obr. 4 [6].



Obr. 4: Schéma zpracování EKG signálu

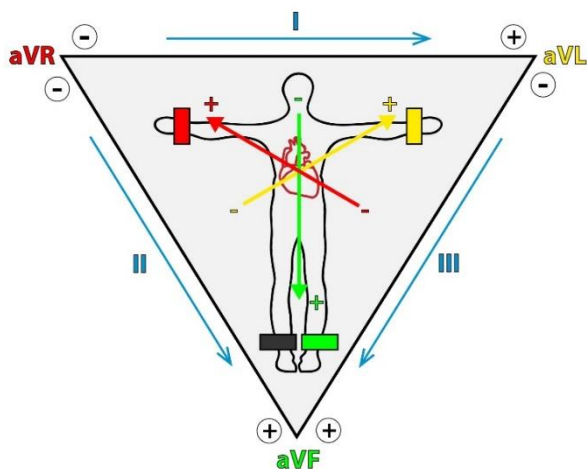
### 3.1 Záznam EKG

Nejčastěji používaným systémem ke snímání EKG je v dnešní době standartní 12 svodové EKG tvořené 10 elektrodami. Každý ze svodů poskytuje jiný úhel pohledu na srdce, tudíž výstupní EKG obraz bude z každého svodu jiný. K ověření pravidelnosti srdečního rytmu postačí pouze 3 elektrody. Pokud chce však lékař analyzovat morfolonii všech kmitů a vln, potřebuje systém všech 10 elektrod [7].

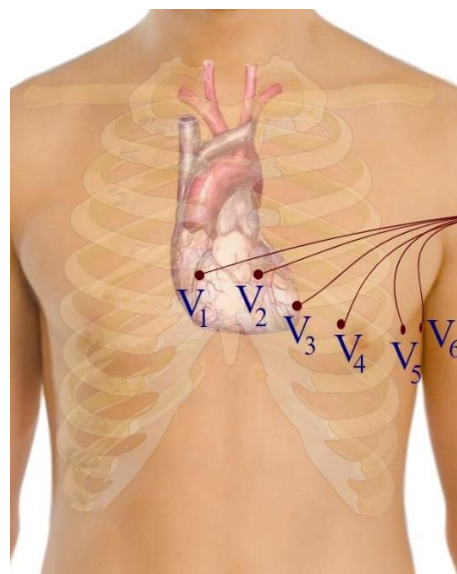
První skupinou svodů jsou 3 bipolární končetinové standartní svody I, II a III, tzv. Einthovenovy svody. Tyto svody registrují rozdíly potenciálu mezi dvěma elektrodami – proto bipolární. Spojují se pak v potenciální Einthovenův trojúhelník (Obr. 5). Umisťují se na pravé a levé zápěstí a levou nohu (bérec). Zemnicí elektroda je pak umístěna na pravý bérec. Elektrody jsou barevně označené, aby nedošlo k záměně svodů a chybnému záznamu (pravá ruka – červená, levá ruka – žlutá, levá noha – zelená, pravá noha – černá). Svod I je tedy po levici srdce, zatímco svody II a III hledí na srdce ze spodní strany pod různými úhly. Záznamy svodů II a III se tak mohou podobat [7], [8].

Druhou skupinou svodů jsou 3 unipolární zesílené (augmentované) Goldbergovy svody aVR, aVL a aVF. Tyto svody využívají stejných elektrod jako bipolární končetinové svody, avšak na rozdíl od Einthovenových svodů registrují napětí mezi jedním z vrcholů trojúhelníku a průměrem zbývajících dvou [7], [8].

Zbýlých 6 unipolárních svodů představují svody hrudní (prekordiální), nesoucí označení V1 až V6. Jak už napovídá název, každý ze svodů je fixován na levou přední stranu hrudníku. Konkrétní umístění každého z nich je na Obr. 6. Kromě výše uvedených svodů existují také speciální elektrody představující další skupiny svodů (např. jícnové) [8].



Obr. 5: Einthovenův trojúhelník [5]

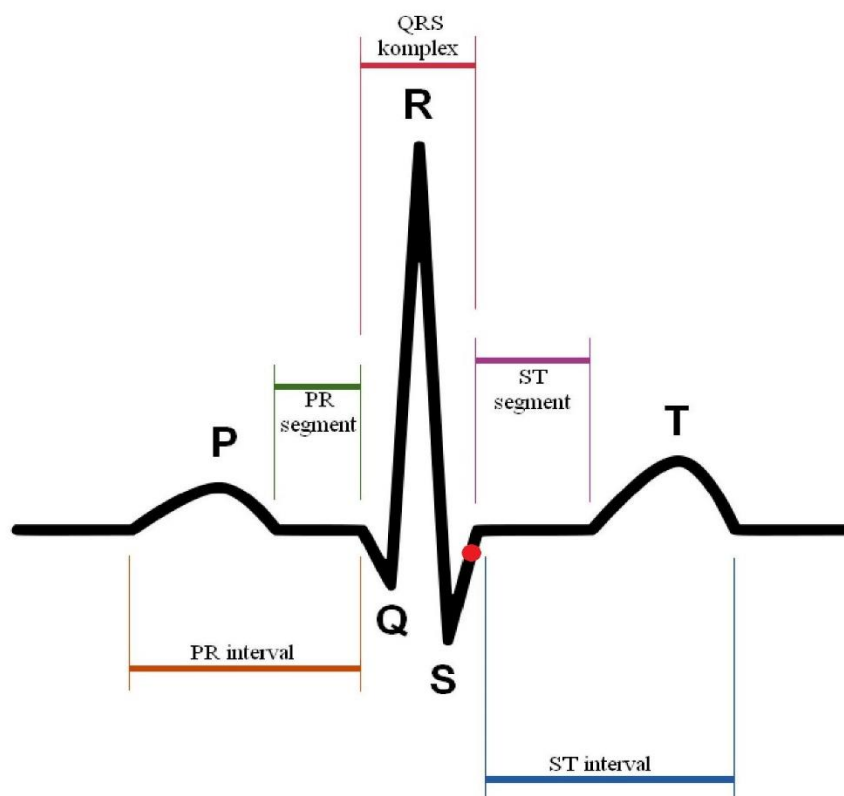


Obr. 6: Umístění hrudních svodů V1 až V6 [5]

### 3.2 EKG křivka

Výstupem elektrokardiografu je EKG křivka, kterou je možné definovat jako grafický průběh elektrické činnosti srdce zaznamenaný v čase. Znázorňuje jednotlivé elektrické proudy, jejich velikosti a směry. Na křivce rozeznáváme několik útvarů. Jsou to vlny P, T a U. Mají nižší amplitudu a oblý tvar. Dále pak kmity Q, R a S mající vyšší amplitudu. Segmenty PR a ST, které zahrnují úsek mezi koncem jedné vlny nebo kmitu do začátku další vlny nebo kmitu a intervaly PR, ST a QT zahrnující segment a sousední vlnu nebo kmit. Část EKG, kde se nevyskytuje žádná vlna nebo kmit, nazýváme izoelektrickou linií. Část EKG křivky je zobrazena na Obr. 7 [6].





*Obr. 7: EKG křivka*

## Vlny

**P vlna** – Obvykle se jeví jako pozitivní kulovitá vlna s výškou amplitudy do 0,25 mV a délkou kolem 80 ms. Je způsobena depolarizací síní a nejlépe ji identifikujeme ve svodech II a V1. Její frekvenční rozsah nabývá hodnot 0 až 10 Hz.

**T vlna** – Představuje repolarizaci komor. Její amplituda sahá do výšky 0,2 až 0,8 mV a délka trvání je 200 ms. Identifikujeme ji podle lehce asymetrického tvaru. Ve všech svodech kromě aVR se jeví jako pozitivní s frekvenčním rozsahem do 10 Hz.

**U vlna** – Zde mluvíme o vlně, jejíž příčina nebyla dosud zodpovězena. Většinou je však přisuzována repolarizaci Purkyňových vláken nebo srdečního septa. Následuje za vlnou T a je patrná pouze na některých záznamech. Nejlépe identifikovatelná je na svodech II, aVL a V2 až V4. Je ploše pozitivní, vždy menší než vlna T s amplitudou do 0,1 mV. Fyziologicky se vyskytuje u mladých lidí nebo sportovců [6].

## **Kmity**

**Q kmit** – Jedná se o první negativní výchylku QRS komplexu vyjádřenou depolarizací septa a papilárních svalů. Její trvání je maximálně 30 ms s amplitudou do 0,3 mV.

**R kmit** – Pozitivní výchylka QRS komplexu s délkou do 100 ms. V hrudních svodech se s amplitudou od 0,7 mV do 3,5 mV zvyšuje od V1 do V5. Ve svodu V6 je pak o něco menší než ve V5.

**S kmit** – Druhá negativní výchylka QRS komplexu. Amplituda nabývá hodnot 0 až 0,8 mV, délka trvání pak do 50 ms. Velikost S kmitu se snižuje od V1 do V5-6.

**QRS komplex** – Trojúhelníkový kmit, nejvýraznější část na celém EKG. Je doprovázen depolarizací komor (neboli komorovou systolou). Délka trvání celého komplexu je za fyziologických podmínek od 50 do 110 ms. Skládá se z pozitivního R kmitu a dvou negativních kmitů – Q a S. Jeho frekvenční rozsah nabývá hodnot 10 až 25 Hz [6].

## **Segmenty a intervaly**

**ST segment** – Izoelektrický interval mezi koncem QRS komplexu a začátkem T vlny, při němž probíhá repolarizace komor. Jeho délka je 100 až 120 ms. Díky elevaci, popř. depresi ST segmentu je možné identifikovat infarkt myokardu. U konce QRS komplexu a začátku ST segmentu nalézáme bod J, tzv. junkční bod. Na Obr. 7 je tento bod zobrazen červenou tečkou.

**PR interval** – Definujeme ho jako časový interval, za který elektrický impulz projde převodním systémem (tzn. z AV uzlu až po Purkyňova vlákna) a depolarizuje tak svalovinu komor. Jeho délka se pohybuje v rozmezí 120 až 200 ms.

**QT interval** – Nejdelší interval trvající až 400 ms. Nalézáme ho od počátku QRS komplexu až po konec T vlny.

**RR interval** – Vzdálenost mezi dvěma R kmity. Při stabilní tepové frekvenci se jeho délka nemění [6].

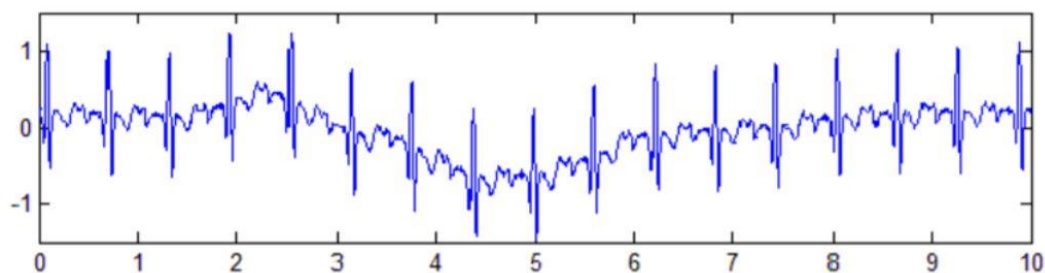
### 3.3 Typy rušení a filtrace

V každém EKG záznamu, ať už klidovém nebo zátěžovém, se setkáváme s různými druhy rušení a artefaktů, které je potřeba odstranit pro určení referenčních bodů záznamu (kmity, vlny, intervaly). Typy rušení zpravidla dělíme z hlediska šířky frekvenčního pásma na úzkopásmové signály a širokopásmové signály. Detailnější rozdělení a jejich filtrace jsou stručně popsány níže.

#### Úzkopásmová rušení

##### *Kolísání izoelektrické linie (drift)*

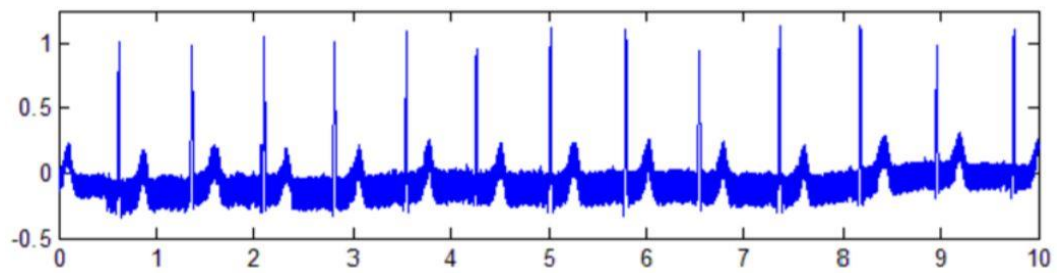
Kolísání izoelektrické linie, neboli drift, může být způsobeno hned několika artefakty. První z nich je způsoben dýcháním pacienta (do 0,3 Hz). Dále jsou to artefakty, které jsou výsledkem změn impedance elektrody a kůže (do 0,8 Hz) a v poslední řadě pohyby pacienta (do 1,5 Hz). V praxi platí, že frekvenční pásmo driftu nepřesahuje 2 Hz, filtrujeme ho tedy jednoduše horní propustí. Příkladem takového rušení je Obr. 8 [9].



*Obr. 8: Rušení signálu EKG driftem*

##### *Síťové rušení (brum)*

Tento typ rušení je způsoben důsledkem indukce napětí z elektrických rozvodů. V Evropských zemích se jedná většinou o frekvenci 50 Hz, v USA a jiných cizích zemích jde o frekvenci 60 Hz. Rušení odstraníme filtrem typu pásmová propust na požadované frekvenci [9].

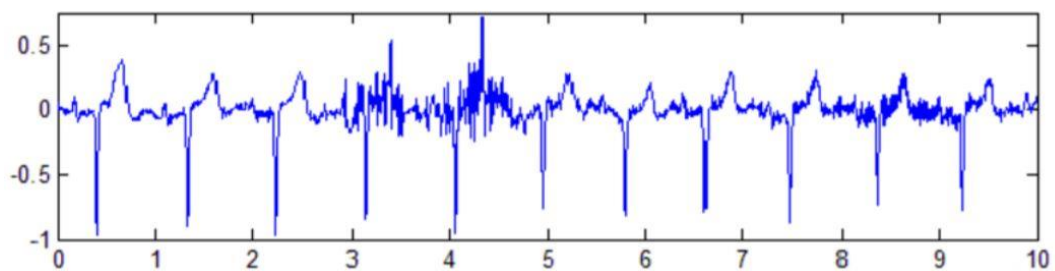


*Obr. 9: Rušení signálu EKG brumem*

## **Širokopásmová rušení**

### *Myopotenciály a pohybové artefakty*

S tímto typem rušení se setkáváme jak při zátěžových testech, kde rušení dosahuje frekvencí od 20 Hz po několik kHz, tak u záznamu klidového EKG, kde se frekvence pohybuje od 100 Hz do 1 MHz. Myopotenciály vznikají při pohybu svalstva pacienta.



*Obr. 10: Rušení signálu EKG myopotenciály*

### *Rychlé skokové změny izoelektrické linie*

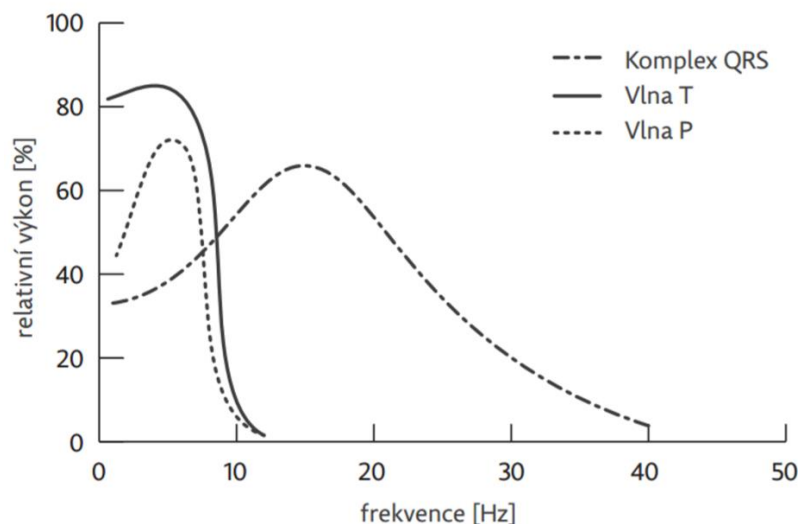
Se skokovými změnami izoelektrické linie se potýkáme při vyšetření batolat a kojenců.

### *Impulsní rušení*

Impulsní rušení patří mezi méně známá a vzniká pouze ve specifických podmínkách snímání. V EKG záznamu se objevuje velmi zřídka. Zdrojem takového rušení mohou být různá zařízení generující elektrický výboj.

### 3.4 Spektrální vlastnosti EKG

Spektrum EKG signálu je možné vidět na Obr. 11. Nejnižší frekvence nepřesahující 10 Hz, jsou zastoupeny vlnami T a P. Naopak nejvyšších frekvencí dosahují kmity Q, R a S tvořící QRS komplex, jehož spektrální maximum dosahuje frekvencí 15 až 20 Hz [7].



*Obr. 11: Spektrum EKG*

Se znalostmi z předchozí kapitoly o různých typech rušení EKG záznamu je možné konstatovat, že se spektrum EKG záznamu prolíná se všemi typy rušení. Jakákoliv filtrace záznamu má tedy dopad na jeho výslednou kvalitu. Vždy je nutné potlačit šum a užitečný signál ponechat v co nejlepší možné kvalitě.

### 3.5 Vyhodnocení záznamu

Při vyhodnocování EKG záznamu jsou v první řadě určeny základní parametry, které můžeme ze záznamu vyčíst. Těmi jsou srdeční rytmus, akce, frekvence a určení srdeční osy (tzv. RAFO). Dále následuje popis kmitů, vln, segmentů a intervalů.

Pro fyziologický srdeční rytmus platí, že je v záznamu vždy přítomna pozitivní P vlna (svody I, II, aVF a V2 až V6) a vzdálenost R kmitů je identická. Tyto dva faktory jsou rozhodující pro určení sinusového (pravidelného) rytmu. Je-li vzdálenost R kmitů rozdílná, mluvíme o nepravidelné akci. Vzniká-li rytmus mimo SA uzel (např. v AV uzlu nebo svalovině síní), hovoříme o nesinusovém rytmu, který dále dělíme na sínový, junkční nebo komorový [8].

Srdeční frekvence se v normě pohybuje od 60 do 90 tepů za minutu. Určuje ji vzdálenost R kmitů. Je-li nižší než 60 tepů za minutu, mluvíme o bradykardii. Při frekvenci vyšší než 90 tepů za minutu se jedná o tachykardii.

Pravidelná srdeční akce se vyznačuje stejnou vzdáleností QRS komplexů. U nepravidelné akce jsou QRS komplexy různě vzdáleny (nejčastěji projev fibrilace síní), popř. je vzdálenost stejná, ojediněle různá (extrasystoly).

Pro určení elektrické srdeční osy sledujeme sklon souhrnného vektoru QRS komplexu, který je nejčastěji  $60^\circ$ . Tento sklon se však i za fyziologických podmínek může posunout do horizontální nebo vertikální roviny. Za normu považujeme vychýlení v rozmezí  $-30^\circ$  až  $120^\circ$ . Je-li kmit komplexu QRS ve svodech I a aVF pozitivní, můžeme v praxi sklon elektrické srdeční osy považovat za normální [10].

## 4 PATOLOGIE SRDCE

Srdečních poruch existuje celá řada. Od ischemií přes hypertrofie a arytmie, až k zánětlivým onemocněním srdce. Uvedeme si však pouze ty nejznámější, snadno detekovatelné na EKG záznamu.

### *Bradykardie*

Lehce detekovatelná arytmie. Nastává, je-li srdeční frekvence nižší než 60 tepů za minutu. Odpovídá tedy jednomu a méně R kmitů za sekundu.

### *Tachykardie*

Opakem bradykardie. Nastává po překročení 90 tepů za minutu, což odpovídá téměř dvěma a více R kmitům za sekundu.

### *Extrasystoly*

Detekujeme na základě QRS komplexů. Objeví-li se v normálním srdečním rytmu mezi dvěma QRS komplexy jeden navíc, mluvíme o extrasystolách. Rozlišujeme extrasystoly komorové a supraventrikulární.

### *Fibrilace síní*

Nejčastější nález po sinusovém rytmu. Vsruchy vznikají kdekoliv v síni a jsou nepravidelně převáděny do komor. Frekvence komor je však díky AV uzlu normální (chrání komory před vyčerpáním). Typickým nálezem je zde nepřítomnost P vlny a nepravidelná srdeční akce.

### *Flutter síní*

Akce je většinou pravidelná. Na záznamu jsou viditelné pravidelné flutterové síňové vlnky (kmitání).

### *Blokáda pravého Tawarova raménka (BPRT)*

Srdeční septum je za fyziologických podmínek aktivováno zleva doprava (z levého Tawarova raménka). Změnou zde nastává tudíž pouze aktivace pravé komory, která je opožděná a projeví se rozšířeným QRS komplexem. Při délce QRS komplexu do 120 ms se jedná o inkompletní blokádu, je-li komplex delší než 120 ms, nastává kompletní blokáda. Potvrzením je pak negativní vlna T a descendentní deprese ST segmentu. Ve svodech V5, V6, I a aVL je přítomen široký S kmit.

### *Blokáda levého Tawarova raménka (BLRT)*

V tomto případě je změněna jak aktivace levé komory, tak mezikomorového septa. QRS komplex je opět při kompletní blokádě delší než 120 ms. BLRT má kromě příznaků BPRT hluboký QS kmit ve svodech V1 až V3 s ascendentní elevací ST segmentu a široké zářezy v R kmitu (tzv. notching) ve svodech V5 a V6.

### *Hypertrofie srdečních komor*

U této arytmie pozorujeme zvýšenou amplitudu R kmitů, elektrická osa srdeční se stáčí ve směru zvětšené komory a QRS komplex se rozšiřuje.

### *Cor pulmonale acutum*

Také známo pod pojmem „dilatace pravé komory“, vzniká na podkladě plicní hypertenze. Má negativní T vlnu ve svodech V1 až V3, je přítomna vertikalizace srdeční osy, popř. tachykardie.

### *Infarkt myokardu*

Jedna z nejznámějších srdečních chorob. Vyznačuje se patologickým Q kmitem a na první pohled viditelnou elevací (popř. depresí) ST úseku [8].



## 5 REALIZACE FILTRACE A QRS DETEKTORU

Tato kapitola se zabývá předzpracováním (filtrací) signálu EKG. Budou zde probrány detailně jednotlivé filtry odstraňující požadovaný druh rušení. V závěru kapitoly bude popsán algoritmus detekce QRS komplexů.

### 5.1 Filtrace driftu

Pro filtraci driftu (kolísání izoelektrické linie) byl vybrán filtr typu horní propust, vycházející z Lynnovy dolní propusti s amplitudovou frekvenční charakteristikou:

$$G_{DP}(z) = \frac{1 - z^{-K}}{K(1 - z^{-1})}. \quad (1)$$

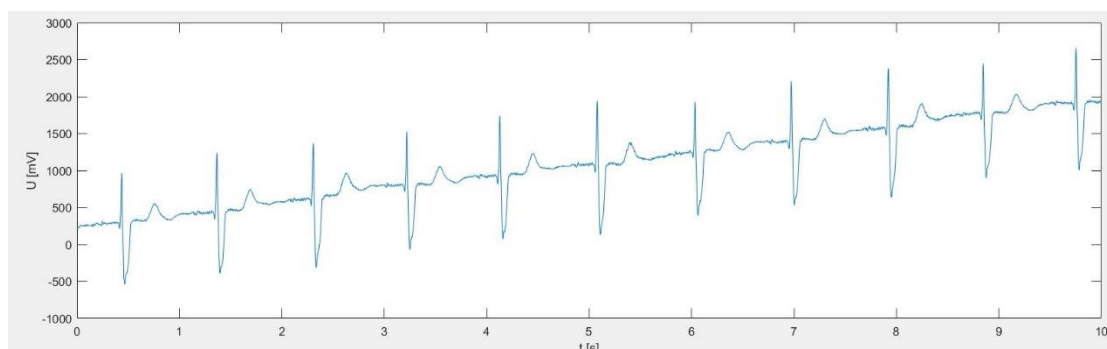
Konstanta K, kterou u Lynnovy dolní propusti představuje celé číslo, určuje body průchodu frekvenční charakteristiky nulou a platí pro ni následující vztah [11]:

$$K = \frac{f_{vz}}{f_m}. \quad (2)$$

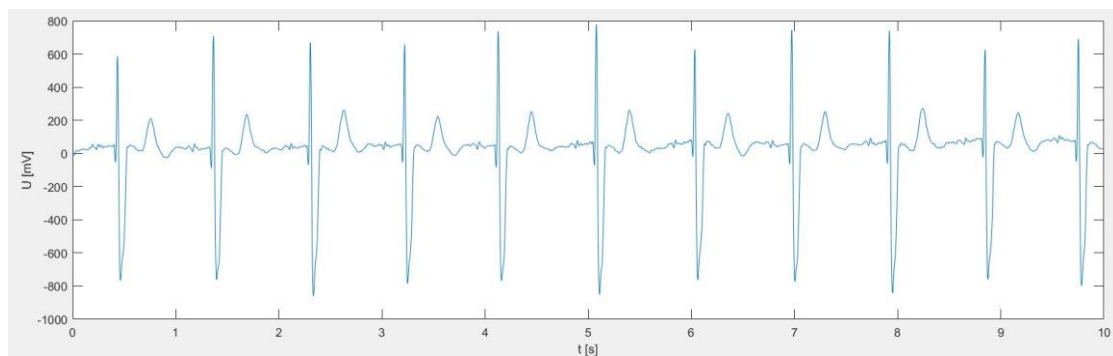
$f_{vz}$ .....vzorkovací kmitočet

$f_m$ .....mezní kmitočet – první průchod nulou

Mezní frekvence byla u tohoto filtru nastavena na hodnotu 2 Hz. Rozdíly v signálu před a po filtraci je možné vidět na Obr. 12 a Obr. 13.



Obr. 12: EKG signál před filtrací driftu



*Obr. 13: EKG signál po filtraci driftu*

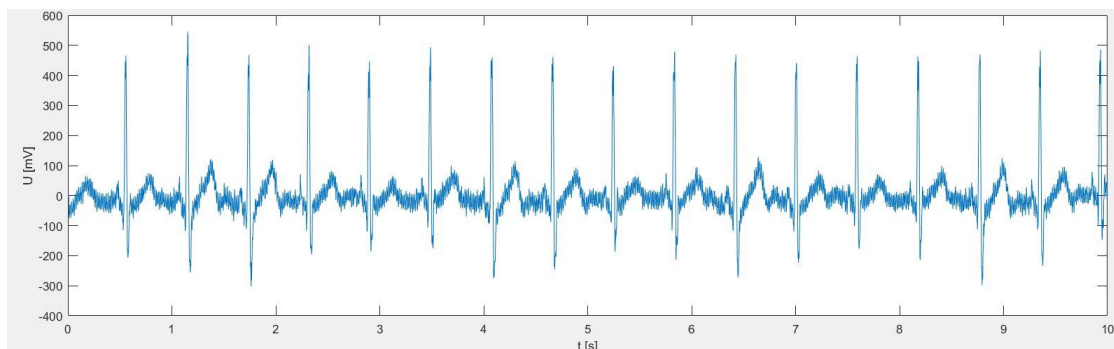
## 5.2 Filtrace myopotenciálů

Filtrace myopotenciálů je řešena lineární dolní propustí metodou váhování impulzní charakteristiky (metoda okénka). Frekvenční charakteristika ideální dolní propusti je periodická a můžeme ji vyjádřit obecně nekonečnou Fourierovou řadou

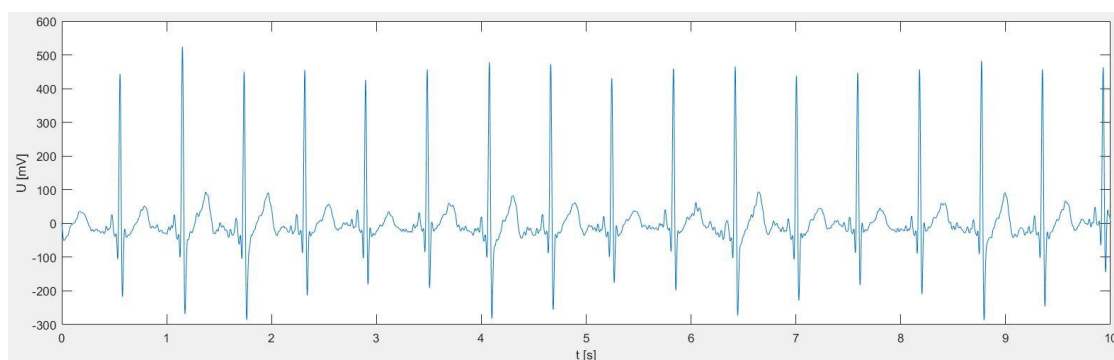
$$G_0(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (h_0(n) \cdot e^{-j\omega nT}), \quad (3)$$

kde koeficienty  $h_{0n}$  jsou hodnoty obecně nekauzální a neomezené impulzní charakteristiky. Ta je však nekonečně dlouhá a proto je nutné ji omezit vynásobením konečným signálem (oknem o délce  $N$ ). Dostaneme  $h(nT)$  – useknutou impulzní charakteristiku. Výslednou frekvenční charakteristiku je pak možné získat diskrétní Fourierovou transformací  $h(nT)$  [12].

Pro získání koeficientů je použit příkaz `fir1`, který provede vhodný návrh filtru. Je tak zvolen pouze řád filtru ( $N = 51$ ) a normalizovaný vektor potlačovaného pásma ( $f_m = 45$  Hz). Samotnou filtraci vstupního signálu provádí příkaz `filtfilt`, který eliminuje zpoždění signálu. Vzhledem k tomu, že se jedná o FIR filtr, koeficient „a“ je roven jedné a koeficientem „b“ je samotný filtr. Na Obr. 14 vidíme signál před filtrací, na Obr. 15 signál po filtraci.



*Obr. 14: EKG signál před filtrací myopotenciálů*



*Obr. 15: EKG signál po filtraci myopotenciálů*

## 5.3 Filtrace brumu

Síťové rušení je filtrováno pásmovou zadržicí, navrženou metodou váhování impulsní charakteristiky (popsána v kapitole 5.2). Mezní frekvence byly nastaveny na 49 a 51 Hz (pro signály z USA nutno změnit na 59 a 61 Hz). Vzhledem k velmi malým odchylkám brumu se tyto mezní frekvence jeví jako přijatelné. Délka okna byla zvolena 500. Od této hodnoty již nebylo pozorováno výrazné zvyšování poměru SNR a vyšší hodnota délky okna by vedla pouze k pomalejší filtraci. Omezení délky impulsní charakteristiky bylo zajištěno Kaiserovým oknem, které se ze všech dostupných jeví jako nejvhodnější. Realizace filtru je opět provedena příkazem `fir1` a samotná filtrace příkazem `filtfilt` [13].

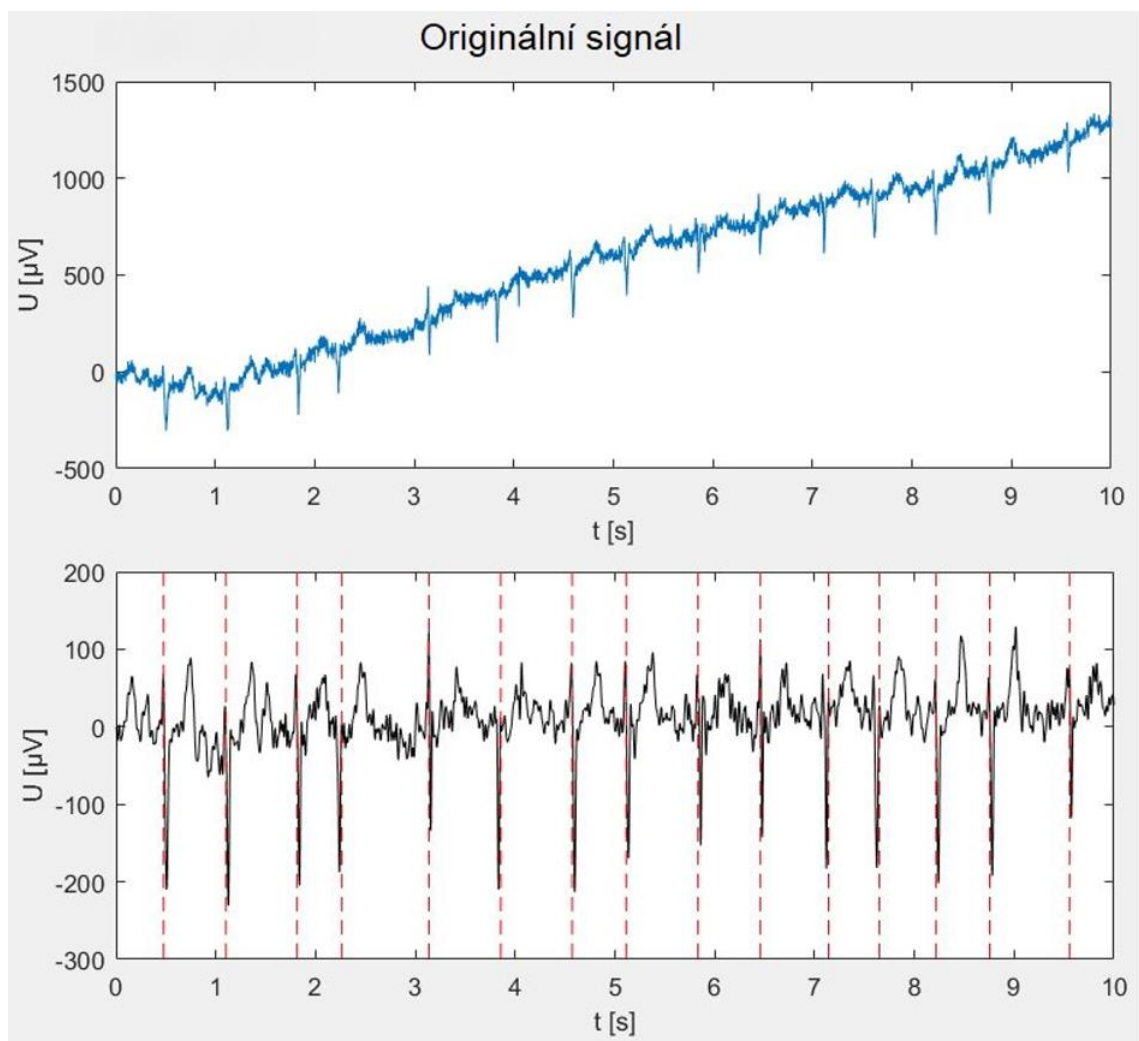
## 5.4 Detekce QRS komplexů

Detekce QRS komplexu je v našem případě řešena metodou vycházející z analytického filtrovaného signálu.

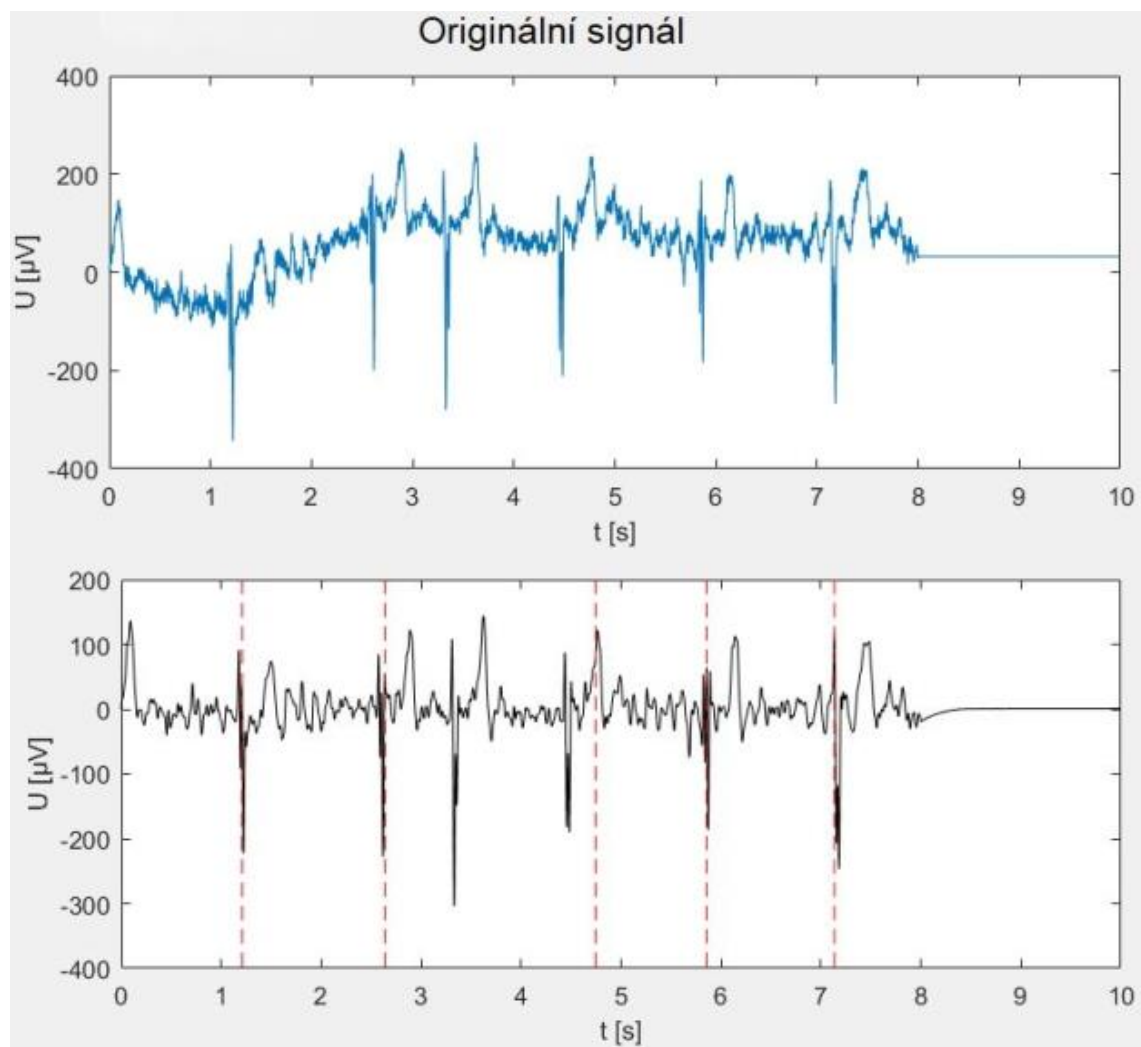
Analytický signál je komplexní. Má reálnou část a imaginární část, kterou lze získat Hilbertovou transformací reálné části (reálného spojitého signálu). Hilbertova transformace tedy vede k vytvoření imaginární složky analytického signálu s jednostranným spektrem [12].

V prvním kroku je nalezena obálka signálu. Širokopásmový EKG signál je přefiltrován pásmovou propustí s mezními frekvencemi 5 a 20 Hz, čímž je získán signál úzkopásmový, který můžeme považovat za téměř harmonický signál, jehož amplituda a frekvence se mění v čase. Výpočet obálky diskrétního signálu ve frekvenční oblasti je proveden v několika krocích. Nejprve je provedena DFT signálu, čímž je získáno jeho spektrum. Hodnoty druhé poloviny tohoto spektra jsou vynulovány, je provedena zpětná DFT a získán analytický signál, jehož absolutní hodnota je námi hledaná obálka. Následným umocněním obálky jsou zvýrazněny námi hledané R píky a tím potlačeny nižší hodnoty – dojde tak ke zvýraznění QRS komplexů proti pozadí [14]. Pro samotnou detekci R vln je v programu nastaven počáteční práh, představující 40 % z průměrného maxima 10 částí signálu. Prah se po detekci jednotlivých komplexů vždy adaptuje na hodnotu právě nadetekovaného komplexu.

Na Obr. 16 můžeme vidět úspěšnou detekci QRS komplexů u zátěžového EKG, na Obr. 17 pak detekci chybnou. Z obrázku je patrné, že třetí komplex nebyl detekován vůbec a na místo čtvrtého komplexu bylo detekována T vlna jemu nadcházející. Tyto chyby byly nejspíše způsobeny chybou v algoritmu pro detekci peaků, který zaměnil R vlnu za T vlnu v důsledku jejich amplitud.



Obr. 16: Úspěšná detekce QRS komplexů u zátěžového EKG



Obr. 17: Chybná detekce QRS komplexů u zátěžového EKG

## 6 DETEKTOR PATOLOGII

I přes nesčetný počet srdečních patologií detekovatelných na EKG záznamu se budeme zabývat pouze některými. Mnohé z nich je totiž po filtraci EKG záznamu, kterou dojde k jeho částečnému znehodnocení, velmi náročné detekovat, nebo je jejich detekce náročná a zdlouhavá. Program je uzpůsobený pro detekci základních arytmii – bradykardii, tachykardii a komorových extrasystol. Dále je program rozšířen o detekci pravého a levého Tawarova raménka.

### 6.1 Detekce bradykardie a tachykardie

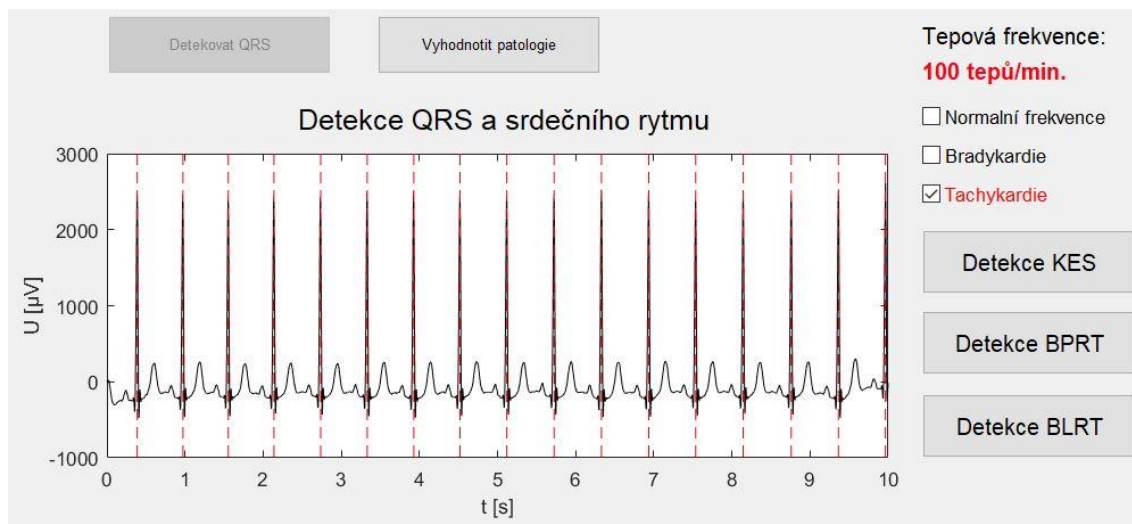
Bradykardie a tachykardie, jinými slovy zpomalená a zrychlená tepová frekvence, jsou v programu jednoduše detekovány z frekvence srdečního rytmu.

Algoritmus nadetekuje ve vybraném úseku signálu všechny R kmity a změří časovou vzdálenost mezi prvním a posledním kmitem – tím se zpřesní výsledná tepová frekvence, protože neuvažujeme celých 10 s záznamu, ale pouze vzdálenost prvního a posledního R kmitu. Počet RR intervalů v tomto úseku je roven počtu R kmitů méně jedna. Označíme-li si časovou vzdálenost prvního a posledního detekovaného R kmitu proměnnou  $RR_{pp}$  a počet R kmitů v našem úseku signálu proměnnou  $R_{pocet}$ , výslednou minutovou tepovou frekvenci (HR) vypočítáme z následujícího vztahu:

$$HR = \frac{60}{RR_{pp}} \cdot R_{pocet} - 1. \quad (4)$$

Ná základě vypočítané tepové frekvence dojde ke klasifikaci mezi bradykardií, odpovídající HR menší než 60 tepů/min., fyziologickou tepovou frekvenci, odpovídající HR od 60 do 90 tepů/min. a tachykardií, odpovídající HR vyšší než 90 tepů/min.

Na Obr. 18 vidíme správně vyhodnocenou tachykardii s tepovou frekvencí 100 tepů/min.



Obr. 18: Detekce tachykardie

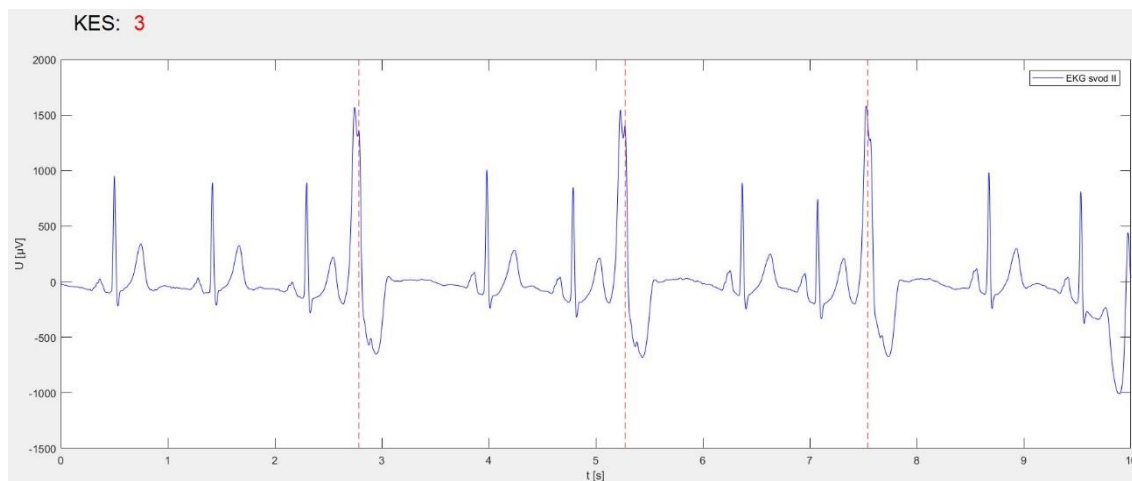
## 6.2 Detekce komorových extrasystol

Detekce komorových extrasystol je realizována metodou tachogramu, která pracuje s polohami QRS komplexů, konkrétně pak s velikostmi RR intervalů. Jak můžeme vidět na Obr. 19, komorové extrasystoly se vyznačují předčasným QRS komplexem, kterému nepředchází vlna P a za nímž následuje kompenzační pauza, která je rovna dvojnásobku fyziologického RR intervalu před výskytem extrasystoly.

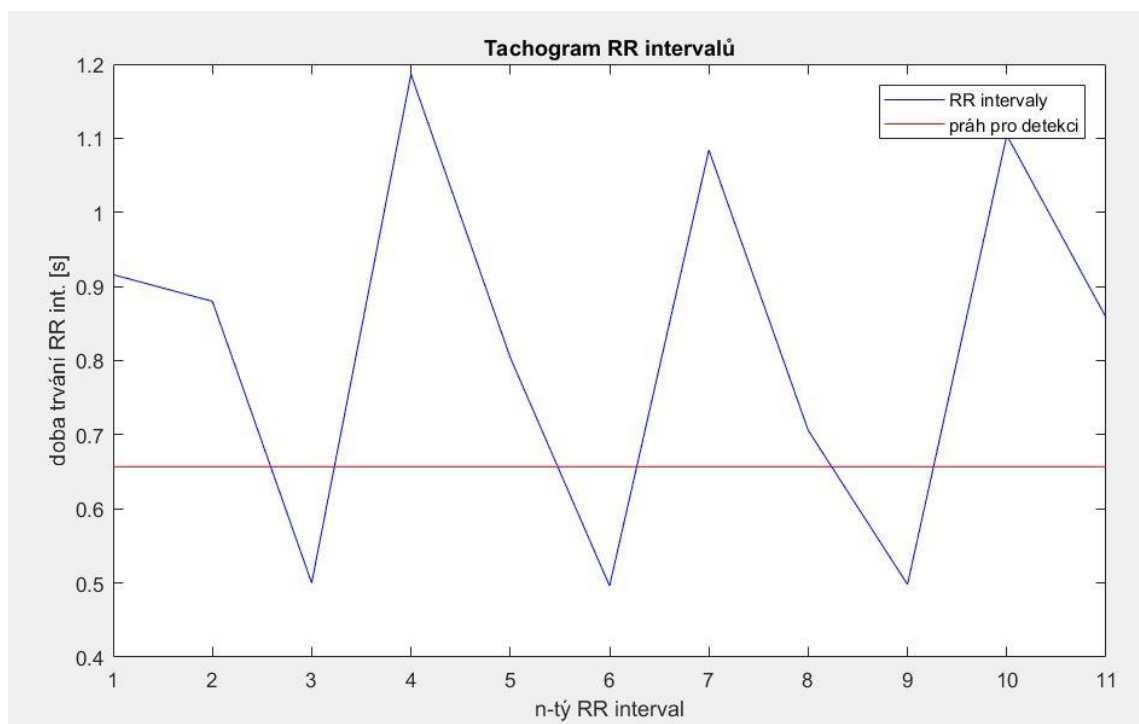
Nejprve jsou z nadetekovaných QRS komplexů vypočteny velikosti RR intervalů. Tyto velikosti jsou zprůměrovány, na základě čehož je vypočten práh odpovídající 0,87 násobku průměru. Již dříve vypočtené velikosti RR intervalů jsou následně porovnávány s prahem. Podprahové hodnoty jsou pak vyhodnoceny jako výskyt komorové extrasystoly, nadprahové jako fyziologický QRS komplex. Účinnost metody vidíme na Obr. 19. Pro detailnější představu je využito tachogramu (Obr. 20.), na kterém je zobrazen vypočtený práh a délky RR intervalů [15].

Ať už jsou extrasystoly více nebo méně viditelné ve všech svodech signálu, v programu je pro zobrazení a detekci využito svodu II. Při detekci je otevřeno nové grafické rozhraní pro větší přehlednost.





Obr. 19: Detekce komorových extrasystol

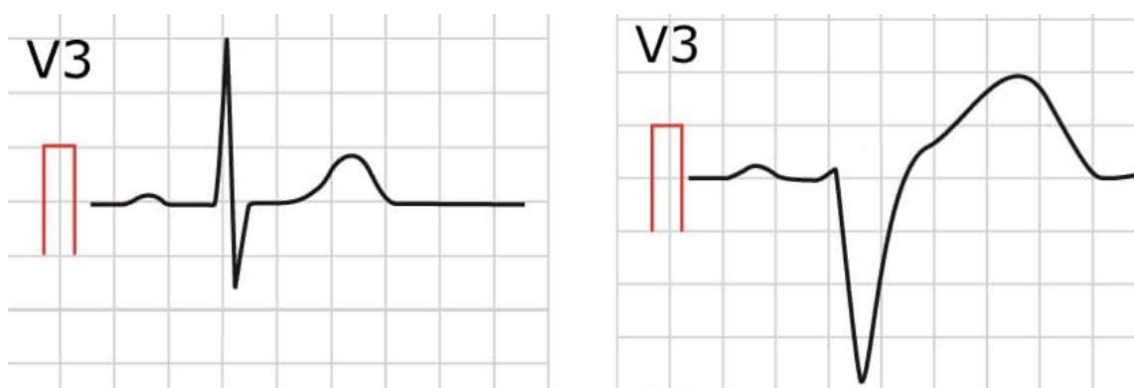


Obr. 20: Tachogram RR intervalů pro detekci komorových extrasystol

## 6.3 Detekce blokády levého Tawarova raménka

Při blokádě levého Tawarova raménka (dále jen BLRT) dochází v důsledku poruchy vedení vzruchu převodním systémem srdečním k opožděné depolarizaci levé komory. Tento jev je dobře viditelný ve svodech V1 až V6.

Program využívá detekce ze svodu V3, kde oproti fyziologickému obrazu QRS pozorujeme obraz rS – kmit R zde dosahuje minimální amplitudy, následuje hluboký a široký S kmit, který plynule přechází v elevaci ST segmentu. Pokud hovoříme o kompletní blokádě, QRS komplex je rozšířen nad hodnotu 120 ms. Porovnání fyziologického QRS komplexu a QRS komplexu BLRT můžeme vidět na Obr. 21 [16].



Obr. 21: Fyziologický QRS komplex (nalevo) a BLRT (napravo)

U detekce BLRT je nutné pracovat s celým QRS intervalem. Nadetekujeme tedy kmitu Q a S a poté bude hodnocena morfologie a délka jednotlivých intervalů.

Pro detekci začátku QRS komplexu byla použita derivační metoda. Nejprve je vypočtena první diference signálu. Následně je stanoven průměr z maxima 10 částí derivovaného signálu a vypočten limit k detekci Q kmitu jako 0,75 násobek z průměru. V momentě překročení tohoto limitu se algoritmus vrací a hledá první překročení nulové hodnoty před tímto limitem. Tato hodnota pak odpovídá Q kmitu [17]. Poté algoritmus přejde k následujícímu QRS komplexu a celý proces se opakuje.

K detekci S kmitu byl vytvořen vlastní algoritmus, který již počítá s nadetekovaným Q kmitem. Nejprve je v signálu určena imaginární poloha S kmitu, nacházejícího se za QRS komplexem (reálně se jedná o polohu T vlny). Poté se algoritmus vrací k již nadetekovanému Q kmitu a hledá místo, ve kterém se začne výrazně zvyšovat strmost signálu. Toto místo odpovídá S kmitu. U některých signálů obsahujících jiné patologické změny EKG křivky by mohlo dojít k chybné detekci

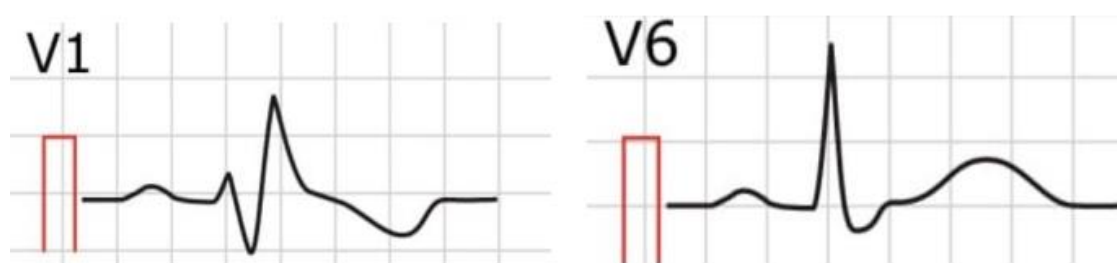
S kmitu vzhledem k výrazné strmosti vzestupné nebo sestupné části T vlny. Po nadetekování S kmitu je proto provedena korekce, která zpřesní polohu na základě strmosti okolních částí signálu.

Jak si lze všimnout na Obr. 21, u zdravého jedince lze předpokládat poměr absolutní hodnoty S kmitu ku R kmitu v rozmezí 0,5 až 2,5 (v extrémních případech až 3,5). U jedinců s BLRT pozorujeme téměř nepatrný R kmit a hluboký S kmit. Lze tak konstatovat, že tento poměr bude výrazně vyšší (nabývá hodnot 6 a více). Prvním stanoviskem k diagnóze BLRT je tedy poměr S kmitu a R kmitu, stanovený u každého QRS komplexu zvlášť. Vyhodnotí-li program QRS komplex jako patologický, je v dalším kroku ověřena délka QS intervalu využívající již popsané detekce Q kmitu a S kmitu. Je-li QS interval delší než 120 ms, program diagnostikuje BLRT.

## 6.4 Detekce blokády pravého Tawarova raménka

Při blokádě pravého Tawarova raménka (dále jen BPRT) dochází v důsledku poruchy vedení vzruchu převodním systémem srdečním k opožděné depolarizaci pravé komory. Tento jev je stejně jako BLRT dobře viditelný ve svodech V1 až V6 [18].

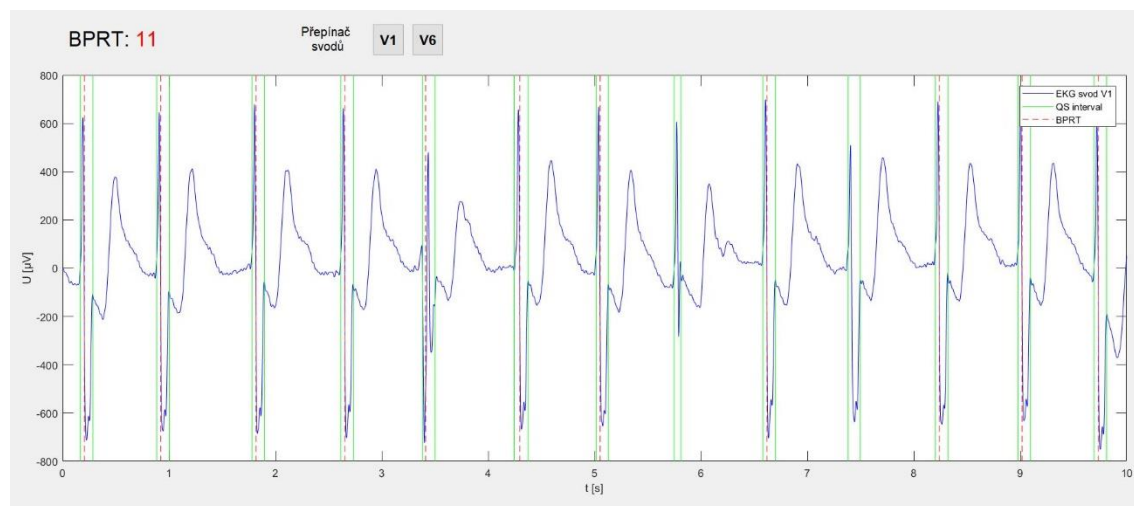
Program využívá detekce ze dvou svodů. Prvním z nich je svod V6, ve kterém je možné pozorovat oproti fyziologickému průběhu hluboký a široký S kmit. Ve svodu V1 se u zdravých pacientů vyskytuje R kmit s minimální amplitudou přecházející v hluboký S kmit, který je pak následován téměř nepozorovatelnou T vlnou. U pacientů s BPRT je však na místo QRS komplexu možné pozorovat obraz rSR', který je možné nazvat také jako terminální R kmit [19]. Průběhy BPRT ze svodů V1 a V6 můžeme vidět na Obr. 22.



Obr. 22: BPRT ve svodech V1 a V6

Při samotné detekci BPRT je nutné rozměřit celý QRS interval. Program využívá detekce Q a S kmitu popsané v kapitole 6.3. Ve svodu V6 je v QS intervalu nalezen R kmit, jehož hodnota je pak porovnávána s hodnotou S kmitu. Zatímco u zdravého pacienta je S kmit téměř zanedbatelný a R kmit dominantní, u BPRT pozorujeme téměř totožné absolutní hodnoty amplitud R a S kmitu. Poměr absolutních hodnot R a S kmitu byl tak pro detekci BPRT empiricky nastaven na hodnotu menší než 2,5. V případě, že algoritmus vyhodnotí QS interval za patologický, je zjištěna délka daného QS intervalu. Převyšuje-li délka intervalu hodnotu 120 ms, je interval označen jako podezřelý z BPRT. Vzhledem k odchylkám a náročnosti detekce této patologie je detekce ošetřena svodem V1, ve kterém se u mnoha pacientů s touto poruchou vyskytuje terminální R kmit. Program tak přejde do svodu V1, ve kterém je opět rozměřen každý QS interval zvlášť. V intervalech jsou detekovány peaky a následně je mezi nimi nalezena minimální hodnota signálu. Jak je patrné z Obr. 22, terminální R kmit si lze představit jako pomyslné písmeno „M“. Po rozměření jednotlivých intervalů a vyhodnocení jejich morfologie na základě nadetekovaných bodů (hodnoty peaků a minima mezi nimi) lze s jistotou diagnostikovat výskyt BPRT.

Na Obr. 23 je možné vidět úspěšnou detekci BPRT až na 10. komplex v pořadí, který nebyl vyhodnocen jako patologický v důsledku jeho délky.



*Obr. 23: Detekce blokády pravého Tawarova raménka*

## 7 VYHODNOCENÍ A GUI

Tato kapitola se věnuje popisu databází, které byly využity k testování programu (CSE databáze a vlastní databáze), vyhodnocení úspěšnosti jednotlivých detektorů na reálných datech a popisu grafického uživatelského rozhraní programu.

### 7.1 CSE databáze

Pro účely testování programu byla použita 12 svodová CSE databáze obsahující 125 signálů. Všechny signály mají délku 10 s, 5000 vzorků a byly naměřeny se vzorkovací frekvencí 500 Hz. Napětí u všech záznamů bylo převedeno na mikrovoly. Na databázi byl testován QRS detektor, detekce základních arytmí, detektor komorových extrasystol a detektor pravého a levého Tawarova raménka.

### 7.2 Vlastní databáze (holter)

Pomocí EKG holteru 360° eMotion Faros od společnosti Bittium bylo naměřeno klidové i zátěžové EKG na 10 pacientech. Každý z pacientů byl měřen po dobu 2 minut. Ze všech záznamů pak byla vytvořena databáze, obsahující 100 signálů. Každý signál disponuje 1 svodem s 5000 vzorky, což odpovídá 10 s EKG záznamu. Databáze byla vytvořena především k testování navržených filtrů, které program využívá a QRS detektoru. Lze na ní však v programu vyhodnotit i základní arytmiie.

### 7.3 Vyhodnocení dat

K posouzení úspěšnosti QRS detektoru a detektorů jednotlivých patologií byly využity senzitivita ( $S^+$ ) a pozitivní prediktivita ( $P^+$ ). Senzitivita značí procentuální úspěšnost detekce dané patologie (popř. QRS komplexu). Pozitivní prediktivita značí pravděpodobnost přítomnosti dané patologie při její detekci. Udává tedy, kolik procent z detekovaných patologií jsou skutečně detekované patologie.

$$S^+ = \frac{SP}{SP + FN} \cdot 100, \quad (5)$$

$$P^+ = \frac{SP}{SP + FP} \cdot 100. \quad (6)$$

SP..... celkový počet správně detekovaných patologií (QRS komplexů)

FN..... celkový počet nedetekovaných patologií (QRS komplexů)

FP..... celkový počet falešně detekovaných patologií (QRS komplexů)

Pomocí [20] a [21] byly zjištěny referenční body námi hledaných patologií v daných signálech CSE databáze a na základě těchto informací bylo provedeno vyhodnocení kvality detektorů. QRS detektor byl testován v lokální oblasti, tzn. že byla posouzena detekce ve všech 12 svodech 125 signálů CSE databáze, což zajistilo přesnější posouzení kvality a detektor tak byl otestován i na problémových svodech. Dosazením do rovnic (5) a (6) byly vypočítány hodnoty, které jsou v Tab. 1, Tab.2 a Tab. 3. Příkladem výpočtu senzitivity QRS detektoru je (7). Celkový počet QRS komplexů ve 12 svodech 125 signálů byl 17856, z toho 17322 bylo správně detekovaných a 534 detekovaných nebylo. Příkladem výpočtu pozitivní prediktivity je (8). Správně detekovaných komplexů bylo 17322 a falešně detekovaných 209.

$$S^+ = \frac{SP}{SP + FN} \cdot 100 = \frac{17322}{17322 + 534} \cdot 100 = 97,00 \%, \quad (7)$$

$$P^+ = \frac{SP}{SP + FP} \cdot 100 = \frac{17322}{17322 + 209} \cdot 100 = 98,81 \%. \quad (8)$$

*Tabulka 1: Výsledky QRS detektoru*

QRS	CSE databáze	Vlastní databáze
Senzitivita ( $S^+$ )	97,00 %	98,78 %
Prediktivita ( $P^+$ )	98,81 %	99,25 %

Jak je patrné z Tab. 1, detektor dosahoval lepších výsledků ve vlastní databázi. To bylo nejspíše způsobeno tím, že vlastní databáze neobsahovala problémové svody s výskytem různých patologických QRS komplexů tak jako CSE databáze. Detektor ve vlastní databázi nejvíce selhával v zátěžovém EKG, v CSE databázi pak při detekci patologických QRS komplexů, popř. ve svodech, které byly zarušeny myopotenciály.

V porovnání s jinými autory dosahoval mnou navržený detektor QRS komplexů podobných výsledků. Například detektor založený na metodě K-means od autorů [22] měl úspěšnost 98,66 %. Bohužel v článku nejsou autory uvedeny přesné hodnoty senzitivity a prediktivity.

*Tabulka 2: Výsledky detektoru srdečního rytmu*

Srdeční rytmus	CSE databáze	Vlastní databáze
Senzitivita ( $S^+$ )	95,20 %	98,00 %
Prediktivita ( $P^+$ )	95,20 %	98,00 %

*Tabulka 3: Výsledky detektorů ostatních patologií*

CSE databáze	Komorové extrasystoly	Blokáda levého Taw. raménka	Blokáda pravého Taw. raménka
Senzitivita ( $S^+$ )	87,80 %	99,04 %	97,56 %
Prediktivita ( $P^+$ )	76,47 %	74,10 %	75,83 %

V Tab. 3 jsou shrnuty celkové výsledky jednotlivých detektorů v programu. Nejhůře obstál detektor komorových extrasystol. Senzitivita, která dosáhla hodnoty 87,80 %, i prediktivita, s hodnotou 76,47 %, byly z velké míry závislé na detektoru QRS komplexů, v případě jehož selhání došlo k chybnému vykreslení tachogramu a poté i k chybné detekci komorových extrasystol.

V případě detektoru blokády pravého a levého Tawarova raménka, u kterého senzitivita dosahovala hodnot 97,56 % a 99,04 %, můžeme s téměř 100 procentní jistotou určit nemocného pacienta, u kterého se tato patologie vyskytuje. Nutno podotknout, že fascikulární blokády předního a zadního hemibloku byly při vyhodnocování brány jako blokády Tawarových ramének. Ačkoliv jsou ve [20] fascikulární blokády číslovány samostatně, z anatomického a fyziologického hlediska jde o stejnou patologii [23]. U BPRT nebyl detekován pouze 1 patologický komplex (signál MO1\_045\_12) v důsledku jeho délky 114 ms, kterou program vyhodnotil jako nedostatečnou pro diagnostiku BPRT (lze vidět na Obr. 23). U BLRT nebyly detekovány 4 komplexy, a to buď v důsledku délek komplexů, nebo odlišné morfologie komplexů. Nižší hodnota pozitivní prediktivity, která u těchto dvou detektorů dosahovala hodnot 75,83 % a 74,10 %, byla způsobena patologiemi, které mají podobný nebo téměř totožný průběh jako blokády Tawarových ramének. Nejčastěji detekční algoritmus zaměňoval blokády Tawarových ramének za infarkt myokardu. Méně často pak za biventrikulární stimulaci nebo jinou arytmiu.

## 7.4 GUI

GUI (Graphical User Interface), neboli grafické uživatelské rozhraní, je navrženo do čtyř bloků a to tak, aby nabídlo uživateli co nejpohodlnější práci se zpracováním signálu a následným vyhodnocením patologií. Vše je detailně popsáno a navrženo tak, aby bylo ovládání co nejvíce intuitivní (např. nemožnost kliknout na tlačítka, která nelze v danou chvíli použít).

Blok vlevo nahoře slouží k načtení signálu, výběru EKG svodu a jeho následnému zobrazení. V případě, že je vybrán signál z vlastní databáze, je programem zobrazeno výstražné okno, ve kterém je uživatel varován, že ať už je vybrán jakýkoliv z 12 nabízených svodů, vždy bude použit pouze jeden, kterým databáze disponuje.

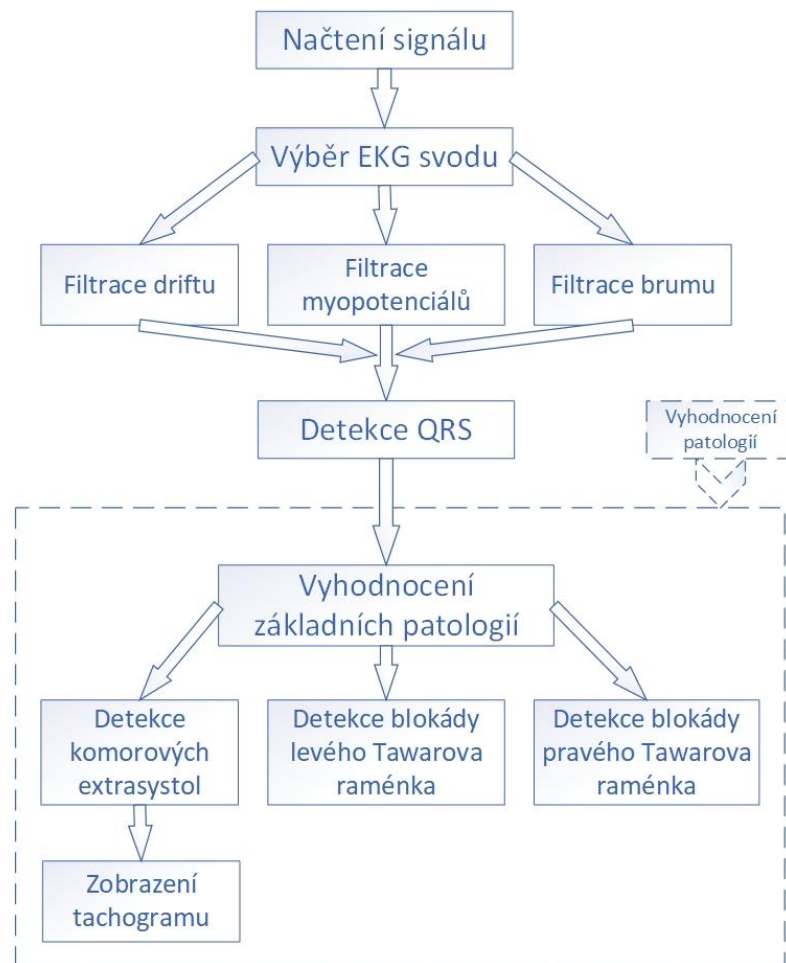
Blok vlevo dole slouží k zobrazení filtrovaného signálu. Filtrace je umožněna třemi tlačítky, která se nachází pod oknem s originálním signálem. Filtrovaný signál lze tlačítkem „Detail signálu“ zobrazit do nového okna, které umožňuje detailnější práci se signálem (např. přiblížení jednotlivých segmentů).

Již při filtraci jakýmkoliv ze tří nabízených filtrů je vpravo nahoře zobrazena frekvenční charakteristika použitého filtru. Napravo od tohoto grafu je pak možnost přepínat frekvenční charakteristiky zbylých dvou filtrů. Dále je zde zobrazen detailní popis každého z vybraných filtrů.

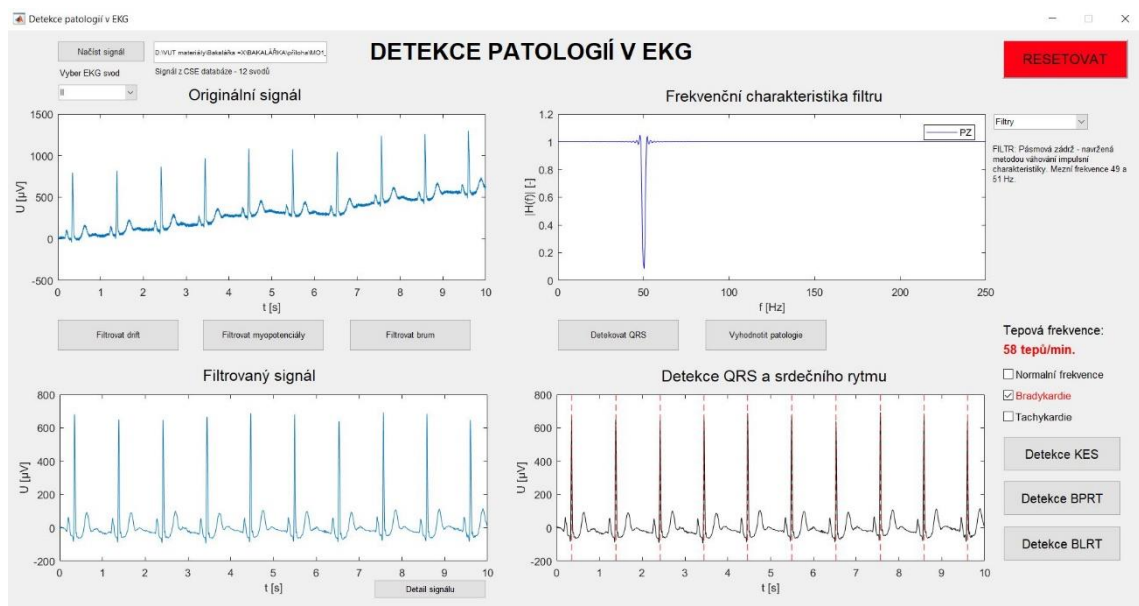
Poslední blok vpravo dole slouží k detekci QRS komplexů a srdečního rytmu. Po stisknutí tlačítka „Detekovat QRS“ jsou pouze nadetekovány a zobrazeny QRS komplexy ve filtrovaném signálu. Po stisknutí tlačítka „Vyhodnotit patologie“ je napravo od grafu zobrazena tepová frekvence (zeleně u frekvence v normě, červeně při výskytu tachykardie nebo bradykardie) a zatržena příslušná arytmie. Dále se zde nachází tři tlačítka, která slouží k otevření nového okna, ve kterém je zobrazen signál svodu použitého k detekci dané patologie. Tlačítko „Detekce KES“ slouží k detekci komorových extrasystol, tlačítka „Detekce BPRT“ a „Detekce BLRT“ pak k detekci blokády pravého a levého Tawarova raménka.

V pravém horním rohu se nachází tlačítko „RESETOVAT“, které vypne program, vyčistí všechny grafy, smaže všechny proměnné a znovu program otevře. Blokové schéma programu je možné vidět na Obr. 24, náhled na GUI pak na Obr. 25.





Obr. 24: Blokové schéma programu



Obr. 25: GUI

## 8 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo porozumět základní teorii související s řešenou problematikou a nastínit základní typy EKG filtrace. Další kroky byly cíleny k navržení algoritmu pro detekci QRS komplexů v námi vybraném úseku signálu a k detekci základních patologií – tachykardie, bradykardie, komorové extrasystoly, blokáda pravého Tawarova raménka a blokáda levého Tawarova raménka. Vytvořené algoritmy byly sjednoceny do programu s grafickým uživatelským rozhraním. Program byl testován na 125 signálech CSE databáze a 100 signálech z vlastní databáze, která byla v rámci této bakalářské práce naměřena EKG holterem na 10 pacientech.

Detektor QRS komplexů dosáhl při testování na CSE databázi senzitivity 97,00 % a prediktivity 98,81 %. Při testování na vlastní databázi byla senzitivita 98,78 % a prediktivita 99,25 %. Detektor komorových extrasystol dosáhl senzitivity 87,80 % a prediktivity 76,47 %. Snížená hodnota prediktivity byla způsobena selháním QRS detektoru. Algoritmus pro detekci blokády levého Tawarova raménka dosáhl 99,04 % senzitivity a 74,10 % prediktivity. Pro detektor blokády pravého Tawarova raménka byly výsledné hodnoty 97,56 % pro senzitivitu a 75,83 % pro prediktivitu. Nemocného pacienta tedy detektory až na několik případů odhalily správně. Detektor však selhával na signálech, které obsahovaly patologie projevující se podobnými tvary na EKG záznamu.

# LITERATURA

- [1] WHITAKER, Robert H. Anatomy of the heart. *Medicine* [online]. 2018, **46**(8), 423-426 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.1016/j.mpmed.2018.05.010. ISSN 13573039.
- [2] TROJAN, Stanislav a Michael SCHREIBER. *Atlas biologie člověka: 430 modelových otázek k přijímacím zkouškám na medicínu : 100 obrazových podkladů k opakování a procvičování*. Praha: Scientia, 2002. ISBN 80-7183-257-x.
- [3] MICHAIL, Michael a Adam J BROWN. Physiology of the normal heart. *Medicine* [online]. 2018, **46**(8), 427-430 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.1016/j.mpmed.2018.05.001. ISSN 13573039. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S135730391830118X>
- [4] FONTANA, Josef. *Funkce buněk a lidského těla* [online]. Dostupné z: <http://fbt.cz/>
- [5] MOUREK, Jindřich. *Fyziologie: učebnice pro studenty zdravotnických oborů*. Praha: Grada, 2005. ISBN 80-247-1190-7.
- [6] KHAN, M. I. Gabriel. *EKG a jeho hodnocení*. Přeložil František KÖLBEL. Praha: Grada, 2005. ISBN 80-247-0910-4.
- [7] ROZMAN, Jiří. *Elektronické přístroje v lékařství*. Praha: Academia, 2006. Česká matice technická (Academia). ISBN 80-200-1308-3..
- [8] HAMAN, Petr. *Výukový web EKG* [online]. Dostupné z: <http://ekg.kvalitne.cz/>
- [9] KAPLAN BERKAYA, Selcan, Alper Kursat UYSAL, Efnan SORA GUNAL, Semih ERGIN, Serkan GUNAL a M. Bilginer GULMEZOGLU. A survey on ECG analysis. *Biomedical Signal Processing and Control* [online]. 2018, **43**, 216-235 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.1016/j.bspc.2018.03.003. ISSN 17468094. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1746809418300636>
- [10] HRAZDIRA, Ivo. *Biofyzika: učebnice pro lékařské fakulty*. Praha: Avicenum, 1990. ISBN 80-201-0046-6.
- [11] VIDAL, Cristian, Andrew PHILOMINRAJ a Carolina DEL. A DSP Practical Application: Working on ECG Signal. CUADRADO-LABORDE, Christian, ed. *Applications of Digital Signal Processing* [online]. InTech, 2011, 2011-11-23 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.5772/25499. ISBN 978-953-307-406-1. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/applications-of-digital-signal-processing/a-dsp-practical-application-working-on-ecg-signal>
- [12] JAN, Jiří. *Číslicová filtrace, analýza a restaurace signálů*. 2. upr. a rozš. vyd. Brno: VUTIUM, 2002. ISBN 80-214-2911-9.

- [13] RÁČEK, Tomáš. *Rychlé číslicové filtry pro signály EKG. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.* 2011.
- [14] PHUKPATTARANONT, Pornchai. QRS detection algorithm based on the quadratic filter. *Expert Systems with Applications* [online]. 2015, **42**(11), 4867-4877 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.1016/j.eswa.2015.02.012. ISSN 09574174. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957417415001116>
- [15] ITTATIRUT, Supat, Apiwat LEK-UTHAI a Arporn TEERAMONGKONRASMEE. Detection of Premature Ventricular Contraction for real-time applications. In: *2013 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology* [online]. IEEE, 2013, 2013, s. 1-5 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.1109/ECTIcon.2013.6559531. ISBN 978-1-4799-0545-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6559531/>
- [16] SMISETH, Otto A. a John M. AALEN. Mechanism of harm from left bundle branch block. *Trends in Cardiovascular Medicine* [online]. 2018 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.1016/j.tcm.2018.10.012. ISSN 10501738. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S105017381830197X>
- [17] CHROBÁK, Martin, Jiří KOZUMPLÍK, Martin CHROBÁK a Jiří KOZUMPLÍK. Porovnání nejpoužívanějších algoritmů pro detekci intervalu QT Comparison of the most widely used algorithms for the [online]. 2013, **15**(4), 233–237. Dostupné z: <http://elektrorevue.cz/cz/clanky/biomedicinske-inzenyrstvi/5/porovnani-nejpouzivanejsich-algoritmu-pro-detekci-intervalu-qt-comparison-of-the-most-widely-used-algorithms-for-the-detection-of-qt-interval/>
- [18] ALVENTOSA-ZAIDIN, Marina, Carme ROCA a Josep BRUGADA. Right bundle branch block and cardiovascular morbidity and mortality in healthy patients. *Medicina Clínica (English Edition)* [online]. 2018, **151**(10), 402–411. ISSN 2387-0206. Dostupné z: doi:10.1016/j.medcle.2018.10.002
- [19] BARKER, Sarah a Chris GHAEMMAGHAMI. Myocardial contusion-induced right bundle-branch block with ST elevation and troponin elevation. *The American Journal of Emergency Medicine* [online]. 2009, **27**(3), 375.e5-375.e7 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.1016/j.ajem.2008.08.006. ISSN 07356757. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0735675708006037>
- [20] MASON, Jay W., E. William HANCOCK a Leonard S. GETTES. Recommendations for the Standardization and Interpretation of the Electrocardiogram. *Circulation* [online]. 2007, **115**(10), 1325-1332 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.106.180201. ISSN 0009-7322. Dostupné z: <https://www.ahajournals.org/doi/10.1161/CIRCULATIONAHA.106.180201>

- [21] SMÍŠEK, Radovan, Lucie MARŠÁNOVÁ, Andrea NĚMCOVÁ, Martin VÍTEK, Jiří KOZUMPLÍK a Marie NOVÁKOVÁ. CSE database: extended annotations and new recommendations for ECG software testing. *Medical & Biological Engineering & Computing* [online]. 2017, **55**(8), 1473-1482 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.1007/s11517-016-1607-5. ISSN 0140-0118. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11517-016-1607-5>
- [22] MEHTA, S. S., D. A. SHETE, N. S. LINGAYAT a V. S. CHOUHAN. K-means algorithm for the detection and delineation of QRS-complexes in Electrocardiogram. *Irbm* [online]. 2010, **31**(1), 48-54. ISSN 19590318. Dostupné z: [doi:10.1016/j.irbm.2009.10.001](https://doi.org/10.1016/j.irbm.2009.10.001)
- [23] BENNETT, David H. *Srdeční arytmie: praktické poznámky k interpretaci a léčbě*. Praha: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-5134-4.

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Stavba srdce [2] .....	10
Obr. 2: Převodní systém srdeční [1] .....	11
Obr. 3: Akční potenciál buňky pracovního myokardu [4] .....	12
Obr. 4: Schéma zpracování EKG signálu .....	13
Obr. 5: Einthovenův trojúhelník [4] .....	15
Obr. 6: Umístění hrudních svodů V1 až V6 [4] .....	15
Obr. 7: EKG křivka.....	16
Obr. 8: Rušení signálu EKG driftem .....	18
Obr. 9: Rušení signálu EKG brumem .....	19
Obr. 10: Rušení signálu EKG myopotenciály .....	19
Obr. 11: Spektrum EKG.....	20
Obr. 12: EKG signál před filtrací driftu.....	24
Obr. 13: EKG signál po filtraci driftu .....	25
Obr. 14: EKG signál před filtrací myopotenciálů .....	26
Obr. 15: EKG signál po filtraci myopotenciálů.....	26
Obr. 16: Úspěšná detekce QRS komplexů u zátěžového EKG.....	28
Obr. 17: Chybná detekce QRS komplexů u zátěžového EKG.....	29
Obr. 18: Detekce tachykardie .....	31
Obr. 19: Detekce komorových extrasystol .....	32
Obr. 20: Tachogram RR intervalů pro detekci komorových extrasystol .....	32
Obr. 21: Fyziologický QRS komplex (nalevo) a BLRT (napravo).....	33
Obr. 22: BPRT ve svodech V1 a V6 .....	34
Obr. 23: Detekce blokády pravého Tawarova raménka .....	35
Obr. 24: Blokované schéma programu .....	40
Obr. 25: GUI .....	40

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Výsledky QRS detektoru .....	37
Tabulka 2: Výsledky detektoru srdečního rytmu .....	38
Tabulka 3: Výsledky detektorů ostatních patologií.....	38